

トランジスタのパルス応答に関する研究

著者	宮田 武雄
号	143
発行年	1967
URL	http://hdl.handle.net/10097/8879

氏 名 (本 籍)	宮 田 武 雄 (茨 城 県)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 1 4 3 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 3 年 3 月 2 6 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	ト ラ ン ジ ス タ の パ ル ス 応 答 に 関 す る 研 究

	(主 査)
論 文 審 査 委 員	教 授 真 野 国 夫 教 授 喜 安 善 市 教 授 西 沢 潤 一 助 教 授 高 木 相

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

パルス技術あるいはディジタル技術において、動的にも静的にも優れたスイッチング特性を有するトランジスタは、歴史的基盤とも相まって代表的なスイッチング素子として主役的な役割を演じているが、そのパルス応答に関する従来までの研究は次のような未解決の問題を残していた。すなわち、トランジスタの大振幅過度動作は一般に非線形な過渡現象であり、その動作応答の解析には非線形性を考慮しなければならず、線形近似理論による従来の取り扱いでは実際の動作応答を正確に把握することができない。また、スイッチングトランジスタの高速化における特有の問題である蓄積時間の短縮に関しては、根本的な施策がほとんどなされておらず、動作理論の積極的な活用による素子の改良が切望されるところである。

本研究は、トランジスタのパルス応答に関する以上のような問題を解明し、トランジスタによるパルス技術あるいはデジタル技術の発達に寄与しようとしたものである。

第2章 トランジスタのパルス応答とその解析法に関する従来の研究

トランジスタのパルス応答解析法としては、J. L. Mollの方法⁽¹⁾、R. BeaufoyとJ. J. Sparkesの方法⁽²⁾、J. G. Linvillの方法⁽³⁾をあげることができるが、これらの方法はいずれも〔1〕遅れの1次近似〔2〕線形性の仮定〔3〕1次元的取り扱い等の共通の問題を有していた。〔1〕および〔3〕の問題についてはその後検討され、修正理論も提案されたが⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、〔2〕の問題に関しては線形近似理論では説明のつかない実験事実もいくつか観測されているにもかかわらず、依然看過されたまま未解決である。

一方、スイッチングトランジスタの開発における動作理論の活用は必ずしも充分でなく、とくに飽和領域スイッチング速度の高速化すなわち蓄積時間の短縮について根本的な検討がなされなければならない。

第3章 活性領域におけるターンオン動作応答の解析

本研究では一貫して通常のトランジスタの通常の動作条件における問題を考察の対象とし、特殊なトランジスタや特殊な動作条件は考慮外とする。まず均一ベース形の真性トランジスタをモデルとして小振幅時定数の注入率(λ :エミッタ端過剰少数キャリア密度とベース不純物濃度の比)依存性を解析し、その結果から大振幅時定数を導出すると次のようになる。

$$\text{エミッタ時定数: } \tau_E \simeq \tau_{E0} \cdot \frac{\lambda}{2\lambda - \ln(1+\lambda)} \quad (1)$$

$$\text{ベース時定数: } \tau_B \simeq \tau_{B0} \cdot \frac{(\delta+1)}{(\delta+1)+\lambda} \quad (2)$$

$$\text{コレクタ時定数: } \tau_C = (\tau_E^{-1} - \tau_B^{-1})^{-1} \quad (3)$$

ここに、 τ_{E0}, τ_{B0} : それぞれ $\lambda \rightarrow 0$ における τ_E および τ_B 、 δ : 表面再結合電流とエミッタ無効電流の比。

このように非線形な大振幅時定数を用いてトランジスタスイッチのターンオン時間 τ_r を解析すると次のようになる。

$$\tau_r = \frac{\tau_{B0}}{\lambda_F} \ln \left(10 + 9 \frac{\lambda_F - 1}{\lambda_F + 1} \right) \quad (4)$$

ただし,

$$\Lambda_F = \left(1 + \frac{8\tau_{BO}I_{BF}}{AqWN_d(\delta+1)}\right)^{1/2} \quad (5)$$

ここに, I_{BF} : 順駆動電流, A : エミッタ面積, q : 電荷素量, W : ベース幅, N_d : ベース不純物濃度。

実測結果と比較すると図1のようになり, 従来の線形近似理論では t_r : 一定となって説明のできなかったターンオン時間の駆動量依存性をよく説明することができる。

第4章 活性領域におけるターンオフ動作応答の解析

まず, 逆駆動のない場合のターンオフ時間 t_f は, τ_B および τ_C の非線形性を考慮して次の

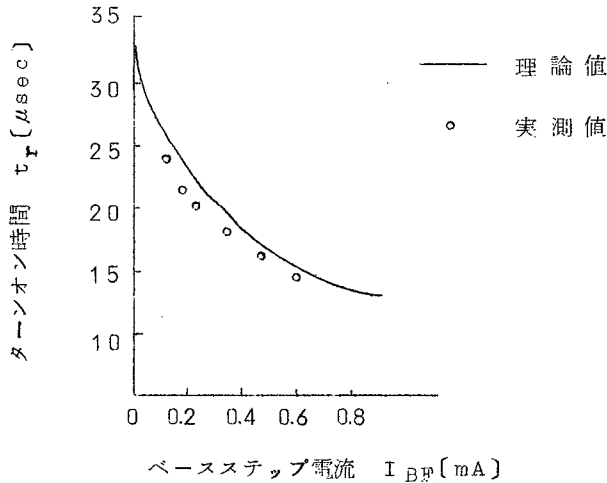


図1 ターンオン時間の駆動量依存性

ように求められる。

$$t_f = \tau_{BO} \ln \frac{\Lambda_F + 1.44}{\Lambda_F + 1} \quad (6)$$

実測結果と比較すると図2のようになり, この場合にも t_f の駆動量依存性がよく説明される。

さらに, 式(4)と(6)から, 従来の線形近似理論では説明のできなかったターンオンとターンオフ動作の非対称性を明らかにすることができる。

また, 逆駆動電流が存在する場合についても解析し, 実験結果とよく一致することを確認めた。

第5章 活性領域過渡応答における負荷効果

本章では、コレクタ接合容量の非線形性を含めて、トランジスタのパルス応答における負荷の効果について考察した。その結果、ベース時定数とコレクタ接合容量の非線形性の相互作用により動作は複雑となるが、スイッチ時間は真性動作成分と負荷効果成分の和として示すことができ、

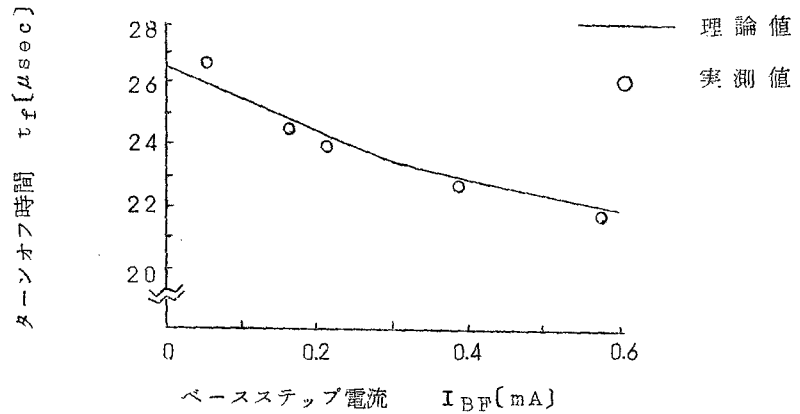


図2 逆駆動のない場合のターンオフ時間

たとえばターンオン時間は次のようになる。

$$t_{rv} = \frac{\tau_{EO}}{\Lambda_F} \ln \left(\frac{1}{1-b} + \frac{b}{1-b} \cdot \frac{\Lambda_F - 1}{\Lambda_F + 1} \right) + \frac{2 h_{FEO} C_V R_L}{\Lambda_F} \left\{ \sqrt{\frac{b}{1-b}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{1-b}} + b \left(\frac{\Lambda_F + 1}{\Lambda_F - 1} + b \right)^{-1} \right\} \quad (7)$$

ここに、 b ：定常値で規準化したスイッチ電流、 h_{FEO} ： $\lambda \rightarrow 0$ における直流電流増幅率、 C_V ：オフ状態におけるコレクタ接合容量値、 R_L ：負荷抵抗。

また、ターンオフ時間についても解析し、いずれも実験結果とよく一致した。

第6章 飽和領域過渡応答の解析

飽和領域動作では外部ベースにおけるキャリア蓄積の効果が大きいので、キャリアの流れのみ一次元と仮定し、構造的には内部ベース領域と外部ベース領域を考慮した擬二次元的モデルにより大振幅飽和時定数を解析した。その結果、次式のようになり、実験結果との比較を図3に示す。

$$\tau_{BS} = \frac{\tau_{B0} \left\{ \lambda_{e3} + (aC - C + 1 + \frac{C(a-1)}{h(\lambda_{c3})}) \lambda_{c3} \right\}}{(\lambda_{e3} + \frac{\lambda_{e3}}{\delta_{e+1}}) + \frac{aC_{e0}}{E_{e0}(\delta_{e+1})} \left\{ \lambda_{c3} + (\delta_{c+1}) \lambda_{c3} \right\}} * \frac{S(a-1)\lambda_{c3}}{E_{e0}(\delta_{e+1})h(\lambda_{c3})} \quad (8)$$

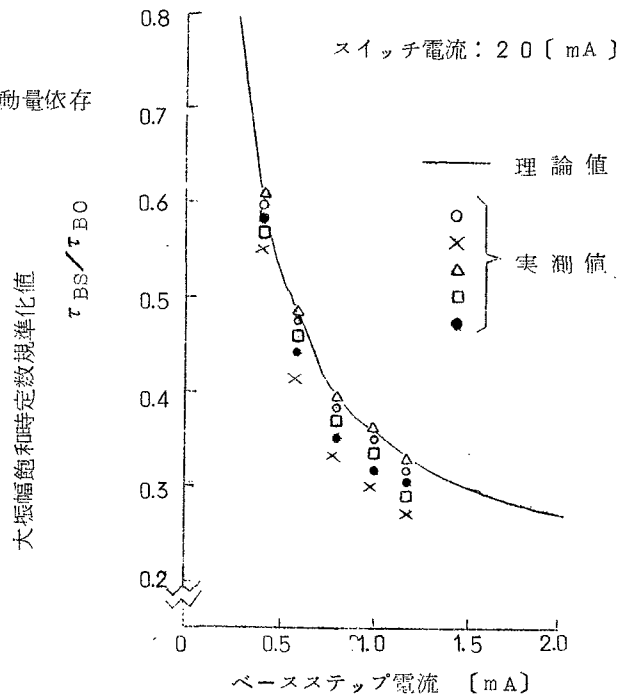
ただし, $h(\lambda_{c3}) = 1 + \frac{CSW}{D_p} \cdot \frac{\lambda_{c3}}{f(\lambda_{c3})}$ (9)

$$f(\lambda_{c3}) = 2\lambda_{c3} - \ln(1 + \lambda_{c3}) \quad (10)$$

ここに, $\lambda_{e3}, \lambda_{c3}$: それぞれ内部ベースのエミッタ, コレクタ端での注入率, a : コレクタとエミッタの面積比, δ_e, δ_c : さきに定義した δ のエミッタ側, コレクタ側の値, S : 外部ベースの表面再結合速度, E_{e0}, C_{e0} : エミッタとコレクタ注入効率に関する定数, C : 外部と内部ベース幅の比。

大振幅飽和時定数を用いて飽和領域過渡応答を解析した結果, 蓄積時間の実測結果とよく一致

図3 飽和時定数の駆動量依存性



し、ボトミング近傍では激しい非線形性を示すが飽和領域内では比較的線形性のよいこと等が明らかになった。

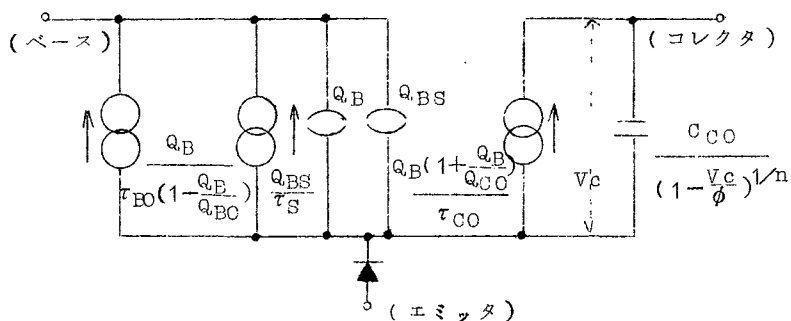
第7章 非線形性を考慮した大振幅過渡応答解析法

本章では前章までの考察の結果に基づき、電荷制御解析法の拡張という形でトランジスタの大振幅過渡応答解析法を提案した。不均一ベース形における効果や寄生的な効果をも考慮し、さらに解析法としての正確さと容易さの妥協、測定可能なパラメータの使用やパラメータ相互の関係等にも留意し、理論的および実験的に考察して表1のような大振幅パラメータおよび図4のような等価回路を提案した。

このような解析法を各種のトランジスタに適用した結果、非線形な過渡応答をよく記述できることが示された。

記号	名 称	単 位	測 定 法
τ_{BO}	ベース時定数	[sec]	小振幅ベース時定数 τ_b を測定し $1/\sqrt{\tau_b}$ を I_B に対してプロットすると直線となり定数項 b および勾配 a を求め、 $\tau_{BO}=1/a^2$ および $Q_{BO}=1/ab$ より決定する。
Q_{BO}	ベース時定数基準電荷	[C]	
h_{FEO}	直流電流増幅率		h_{FE} のベース電流 I_B 依存性を測定し $I_B \rightarrow 0$ の外挿値で h_{FEO} を決定し、 h_{FE} の最大値を与えるベース電流 I_{BF} を求めて式
Q_{CO}	コレクタ時定数基準電荷	[C]	$Q_{CO} = Q_{BO} - 2/(Q_{BO}^{-1} + 1/I_{BF}\tau_{BO})$ より Q_{CO} を決定する。
C_{CO}	コレクタ接合容量	[F]	大きい逆バイアスで C_c の電圧依存性を測定し両対数方眼上にプロットすると直線となることを利用して n を求め、さらに2点の値より C_{CO} 、 ϕ を決定する。
n	コレクタ接合容量指数		
ϕ	コレクタ接合拡散電位	[V]	
τ_S	飽和時定数	[sec]	十分に飽和過剰駆動し逆駆動のない状態で蓄積時間を測定し、片対数方眼上に駆動量に対してプロットすると直線となりその勾配より求める。

表1 大振幅パラメータとその測定法




- ※ 活性領域では $Q_{BS} = 0$
- ※ 飽和領域では Q_B はボトミング値で一定
- ※  は容量無限大のコンデンサ

図4 大振幅等価回路

第8章 スイッチングトランジスタの蓄積時間短縮法

本章では，トランジスタの過渡動作理論の活用により，蓄積時間を短縮し応答の高速化を図る方法を提案した。

飽和時定数の表式を，逆注入効率の効果を含めて拡張すると次のようになる。

$$\tau_S = \frac{\tau_N + \beta_N r_I \tau_I}{1 + (1 - r_N) / r_N - \beta_N \beta_I r_I} \quad (11)$$

ここに， β_N, β_I : 順および逆輸送効率， τ_N, τ_I : 順および逆キャリア走行時間， r_N, r_I : 順および逆注入効率

蓄積時間短縮の原理は，飽和過剰キャリアの注入または蓄積を防止することであり，ここでは r_I を低下させる逆注入効率低下法ならびに β_I を低下させる不均一キャリア寿命法を考案し，式(11)によってその効果を検討した。その結果，動作理論的な諸特性の許容範囲内で， τ_S をほぼ走行時間程度まで改善できることが示され，高速スイッチングトランジスタの開発に対する有用な示唆を得ることができた。

第9章 総合的検討

本章は各章において論じられなかった全体的な検討である。非線形なインディシャル応答を記述する微分方程式を積分方程式として取り扱うことにより応答波形の観察から非線形動作が知られることを示し、また外部ベース領域の効果を含み解析法の応用として飽和クランプ回路の動作解析を行った。さらに蓄積時間短縮効果を電荷制御解析法の基礎概念に基づいて考察し、その意味を明らかにした。

第10章 結 論

トランジスタの大振幅過渡応答について、動作の非線形性および幾二次元的な構造の効果を含めて実際動作に即した解析をすることにより、まず基本的な非線形性とその効果が明確になり、従来の線形近似理論では説明のできなかつた実験事実を明らかにすることができた。さらに、基本的な動作応答解析の基礎に立ち、寄生的効果や各種トランジスタの特徴等も加味し、解析法としての正確さ、容易さ、測定可能なパラメータの使用等を考慮に入れて、非線形な大振幅過渡応答解析法を提案した。

一方、スイッチングトランジスタの蓄積時間短縮に関する動作理論の積極的な活用がなかった点に着目し、逆注入効率の低下による方法および不均一キャリア寿命による方法を考案し、その改善効果を検討して高速スイッチングトランジスタ開発への基礎資料を得た。

以上、本研究では、トランジスタのパルス技術あるいはデジタル技術への応用において重要な問題となるトランジスタのパルス応答に関し、従来未解決のまま看過されていた問題を解明し、動作応答解析理論の拡張と活用を図り、この分野における新しい知見と示唆を得ることができたと考えられる。

謝

辞

本研究の遂行にあたり終始懇切丁寧なる御指導御鞭撻を賜った真野国夫教授、有益なる御教示御助言を賜った喜安善市教授、西沢潤一教授、高木相助教授ならびに熱心な御討論を賜った多くの方々に深く感謝する次第である。

文 献

- (1) J.L.Moll:P.IRE 42 [12] P.1773(Dec.1954)
- (2) R.Beaufoy,J.J.Sparkes:ATE J. 13 P.310(Oct.1957)
- (3) J.G.Linvill:P.IRE 46 [6] P.1141(June 1958)
- (4) A.N.Baker:IRE T. ED-8 P.152(March 1961)
- (5) 柳井,菅野,多田:信学会トランジスタ研資TR 63-17(昭38-08)
- (6) R.A.Schmeltzer:IEEE T. ED-10 P.164(May 1963)

審 査 結 果 の 要 旨

トランジスタのパルス応答に関する研究は、スイッチ素子としての用途の激増とともに、回路と素子の共通領域における重要問題である。一般にトランジスタのパルス応答は、非線形な過渡現象で、線形近似理論による従来の取り扱いでは、実際の動作応答を適確に把握することは出来ない。

本論文は、トランジスタのパルス応答特性を、トランジスタの非線形性を含む大振幅過渡応答として解析することにより、実際の動作を把握解明し、実用性を考慮した記述法を提案するとともに、動作理論の積極的活用により、スイッチングトランジスタの蓄積時間短縮法を考案し、トランジスタによるパルス技術の発達に寄与することを目的としたもので、10章よりなる。

第1章は緒論であり、第2章では従来の解析法を検討し、本論文の立脚点を明確にしている。

第3章および第4章では、それぞれ活性領域におけるターンオン、ターンオフ動作応答につき、その時定数の非線形性を検討し、大振幅パラメータを導出して、新方法により動作解析をなし、従来の方法との比較検討を行なっている。なお、従来理論的に対称として取り扱われていたターンオン、ターンオフの両動作につき、その非対称性を指摘している。これらは新しい知見である。

第5章では、負荷効果を考慮した活性領域の過渡応答につき検討し、従来考察されていなかった要因を含むターンオン、ターンオフ時間を与える理論式を提案している。

第6章では、飽和領域における過渡応答につき、大振幅飽和時定数を導出し、非線形性の影響を考慮して、解析を行なった結果について述べている。

第7章では、以上を取りまとめて、大振幅パラメータを求める方法を述べ、これらを用い非線形性を考慮した大振幅過渡応答解析法を提案している。これは、電荷制御解析法を拡張し、実際の動作を適確に把握出来、かつ取り扱い容易な解析法を提案したもので、注目に値する。

第8章では、以上で検討した理論を活用し、トランジスタ特有のキャリア蓄積時間の短縮を計るため、逆注入効率の低下による方法および不均一キャリア寿命による方法の二案を述べている。これらは、トランジスタの製法と相まって、興味ある提案である。

第9章は総合的検討であり、第10章は結論である。

以上、これを要するに、本論文はトランジスタのパルス応答に関し、独創的な研究のもとに、実際の動作をより適確に把握することが出来、しかも取り扱い容易な新しい解析法を提案するとともに、パルス応答時間短縮法に新提案をするなど、電子工学ならびに工業に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。